

FRP シート補強 RC 柱の段落し部におけるシートの曲げ付着特性

Flexural Bonding Property of FRP Sheet Adheared to RC Column with Rebar Stepped Arrangement

三井建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 室蘭工業大学 学生員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 室蘭工業大学 ○学生員 澤田 純之 (Sumiyuki Sawada)

1. はじめに

近年、阪神・淡路大震災を教訓に地震防災の重要性が再認識される中で鉄道・道路橋橋脚等の既存RC構造物を対象とした耐震補強工事が各地で盛んに行われている。特に施工性、耐食性に優れる連続繊維シート(以下、FRPシート)を用いた接着工法が数多く採用されるようになってきた。著者等はこれまでFRPシートで曲げ補強したRC梁の静載荷実験を実施し、FRPシートの曲げ補強効果やシートの剝離性状に関する検討を行ってきた¹⁾。その結果、RC梁に接着したFRPシートの剝離挙動は下縁かぶりコンクリート部のひび割れ性状に大きく影響され、一面せん断的な剝離挙動と大きく異なることなどを明らかにしている。一方、単一RC柱のような片持ち梁状態の部材をFRPシートで曲げ補強した場合の研究例は少なく、特に既存RC橋脚等の段落し部を曲げ補強する場合を想定したFRPシートの曲げ補強効果や曲げ付着特性に関する検討は未だ十分とはいえない。

本研究では、FRPシートを用いた段落し部を有するRC柱の合理的な曲げ補強設計手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、FRPシートで曲げ補強したRC柱の水平単調載荷実験を行ない、シートの曲げ補強効果や曲げ付着特性を検討している。実験では水平荷重の他、柱高さ方向の水平変位分布、主鉄筋およびFRPシートの歪分布を測定し、FRPシートの剝離メカニズムを詳細に検討している。

2. 実験概要

表-1には本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強を含めFRPシートの補強量を3種類に変化させた全4体である。なお、本実験に用いたFRPシートは全てアラミド繊維製FRP(以後、AFRP)シートである。表中、試験体名は無補強試験体をN、その他補強試験体は貼り付けたシート材料の頭文字Aと目付量の組合せによって表わしている。

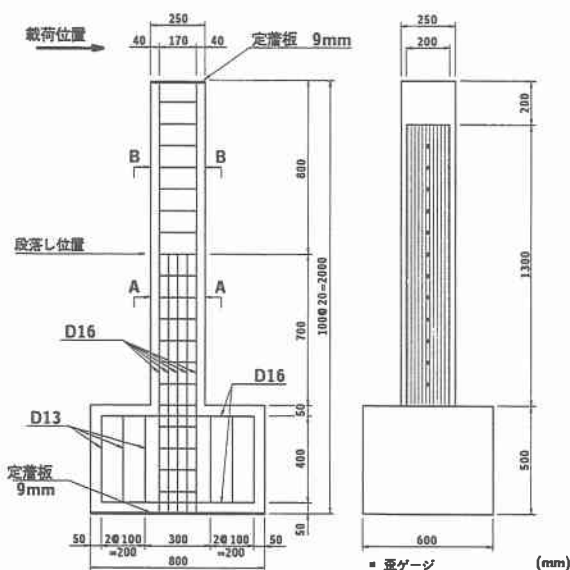
図-1に試験体の形状寸法および配筋、AFRPシートの貼り付け状況を示している。実験に用いた試験体の断面寸法は25cm×25cmでフーチングからの柱高さは150cmである。本実験では段落し部の曲げ付着特性に着目しているため、A830を除いてシート補強後も段落し部で終局に至るように断面設計を行なっている。そのため、段落し位置を基部より70cmの位置に設定し、その位置で主鉄筋を16本から4本に減少させている。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材	繊維目付量 (g/m ²)
N	-	-
A200	AFRP シート	200
A415		415
A830		830(415×2)

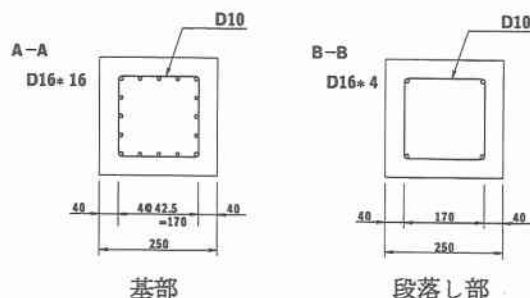
表-2 AFRP シートの力学的特性

繊維目付量 (g/m ²)	厚さ (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
200	0.138	2.48	131	1.89
415	0.286			



側面図(配筋概要)

正面図(補強概要)



基部

段落し部

図-1 試験体の概要

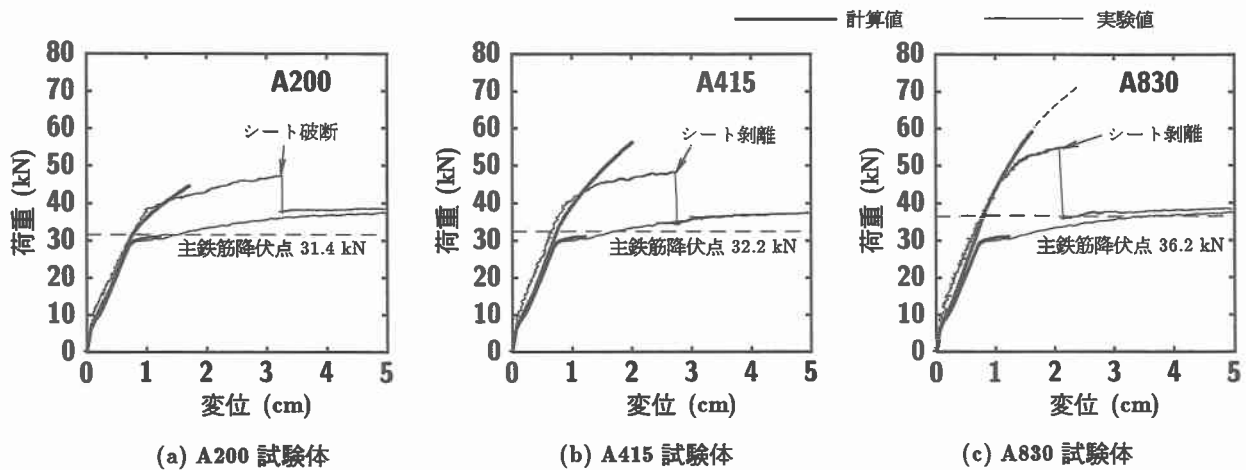


図-2 荷重-変位曲線

表-3 実験結果の一覧

試験体名	実験結果		計算結果		降伏荷重比	最大荷重比	破壊状況
	降伏荷重 P_{ye} (kN)	最大荷重 P_{ue} (kN)	降伏荷重 P_{yc} (kN)	最大荷重 P_{uc} (kN)	P_{ye}/P_{yc}	P_{ue}/P_{uc}	
N	29.2	38.0	27.9	30.4	1.05	1.22	段落し部圧壊
A200	31.4	47.1	30.3	44.6	1.04	1.05	シート破断
A415	32.2	48.2	31.8	56.2	1.01	0.86	シート剝離
A830	36.2	54.7	35.9	74.3(59.2)	1.01	0.74(0.92)	シート剝離

主鉄筋には D16(SD345) を用い、スターラップには D10 (SD295A) を用い 10 cm ピッチで配筋した。AFRP シートは、試験体基部から高さ方向 130 cm の範囲に幅 20 cm で圧縮面、引張面の両面に柱高さ方向に貼り付けている。なお、シートを接着するコンクリートの表面には付着性能向上に有効なブラスト処理を施している。歪ゲージは FRP シートの中心線上に段落し部より上・下方向に 10 cm 間隔で貼り付け、主鉄筋にも同じ高さ位置にゲージを貼り付けている。実験時におけるコンクリートは材令 77 ～ 102 日、平均圧縮強度は 24.4 MPa であった。また、主鉄筋の降伏強度は引張試験より 380.4 MPa であった。表-2 には AFRP シートの力学的特性を示している。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位曲線

図-2 には AFRP シート補強試験体に関する荷重-変位曲線の実験結果および計算結果を無補強の場合と比較して示している。なお、実験時において載荷点変位の測定に不具合が生じた実験ケースがあったため、全試験体において柱頭部より 20 cm 下方の測定点の変位を用いている。計算は前述の各材料の特性値を用いて断面分割法により、圧縮縁コンクリート歪が終局圧縮歪である $3,500 \mu$ に至るまで行なっている。なお、A830 試験体の計算結果は基部が破壊する場合を実線で、段落し部が破壊する場合を破線で示している。

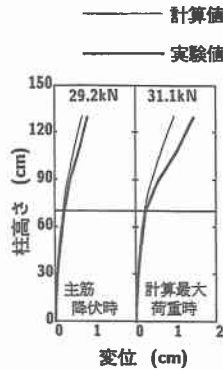
図より、AFRP シート補強した試験体は総じて無補強の場合と異なり、段落し部の主鉄筋降伏後においても荷重がほぼ初期剛性を保った状態で増大していることがわかる。その後、荷重-変位関係のなす勾配が低下し、

最終的にシートの剝離もしくは破断により終局に至っている。なお、実験結果は計算結果と比較して早期に荷重-変位関係のなす勾配が大きく低下しており計算上の仮定と異なった性状を示している。この勾配低下は、後述するように段落し部近傍で発生したピーリング作用やせん断ずれに関連するものと考えられる。

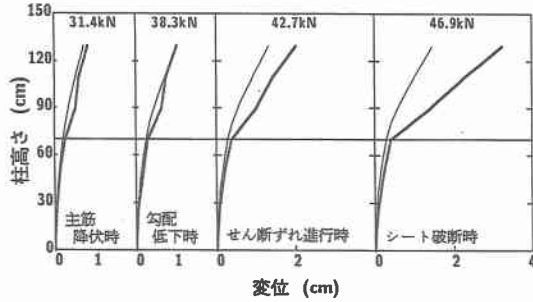
表-3 には降伏荷重および最大荷重の実験および計算結果の一覧を示している。また、降伏荷重、最大荷重の計算結果に対する実験結果の比として降伏荷重比および最大荷重比と各試験体の破壊状況を合わせて示している。なお、A830 試験体の基部破壊に対応する最大荷重および最大荷重比を () 付きで示している。表より、降伏荷重比はいずれの試験体も 1.0 程度となっていることより、断面分割法に基づいた計算結果は主鉄筋降伏時まで精度良く実験結果を再現しているといえる。これに対し、最大荷重比は 0.74 ～ 1.22 と各試験体で大きく異なっている。シート破断した A200 試験体の最大荷重比は 1.05 であり計算値と実測値はほぼ対応している。一方、A415 試験体の最大荷重比は A200 試験体のそれを大きく下回り、最大荷重比に与える目付量の影響が大きいことがわかる。また、A830 試験体は計算上は基部破壊であったがシートの剝離破壊を示し、最大荷重比は基部破壊を想定すると 0.92、段落し部破壊を想定すると 0.74 であり、ともに実測値は計算値を下回っている。なお、シートの目付量が大きくなると最大荷重比が小さくなる傾向は RC 梁を用いた著者らの既往の実験結果と合致している。

3.2 変位分布性状

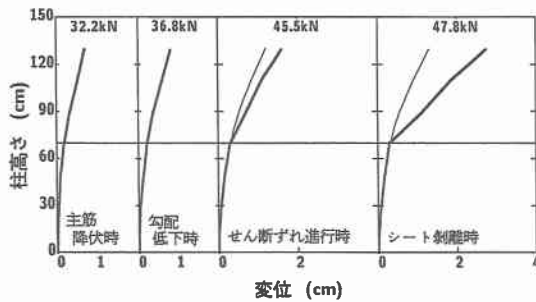
図-3 には、各荷重段階における柱高さ方向における変位分布性状の実験結果と計算結果を比較して示してい



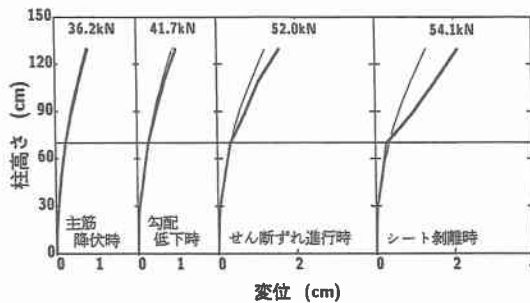
(a) N 試験体



(b) A200 試験体



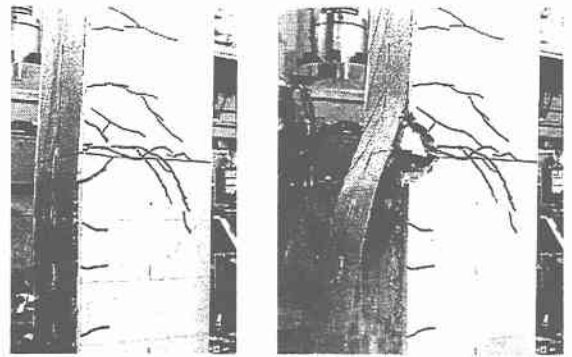
(c) A415 試験体



(d) A830 試験体

図-3 各荷重段階における変位分布性状

る。荷重段階は、実験結果における 1) 主鉄筋降伏時、2) 図-2を参考にした荷重-変位関係のなす勾配の低下時 (以下、勾配低下時)、3) それ以後のせん断ずれ進行時および 4) シート破断時もしくは剥離時とした。なお、A200 試験体ではシート破断時の荷重が計算最大荷重よりも若干大きいものの大差がないため、計算最大荷重時の変位分布性状と比較している。また、N 試験体については主鉄筋降伏時および計算最大荷重時について



(a) せん断ずれ進行時

(b) 剥離破壊時

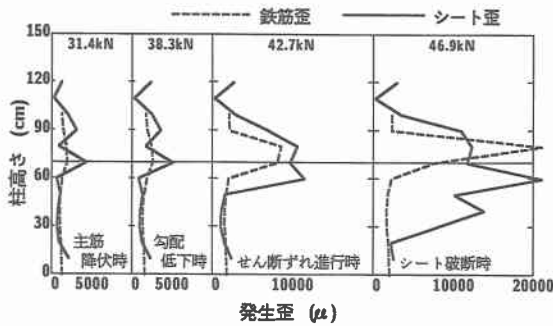
写真-1 破壊性状 (A415 試験体)

のみ示している。

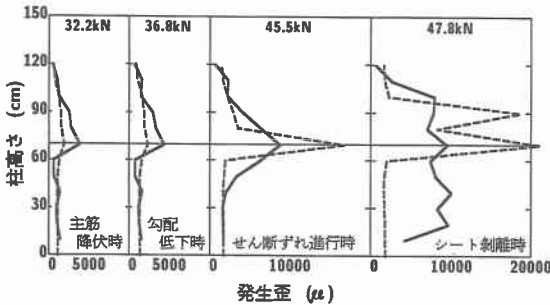
図より、N 試験体は主鉄筋降伏後段落し部において角折れし、計算結果と異なる変位分布性状を示しているのに対し、AFRP シート補強した試験体は主鉄筋降伏時、勾配低下時において著しい角折れは見られず、計算結果は実験結果とほぼ同様の変位分布性状を示していることがわかる。また、せん断ずれ進行時からシート破断時もしくは剥離時にかけて実験結果は段落し部を起点として徐々に角折れし、計算結果と対応しなくなる傾向にあることがわかる。また、この傾向は目付量の少ないシートを用いた場合ほど顕著である。すなわち、シートの目付量が少ないほど 1) 曲げ剛性が小さいために角折れしやすく、2) 引張縁かぶり部のコンクリートブロックによるシートの押し出し作用の影響を受けやすく、3) 結果としてピーリング現象が低荷重より柱上下方向に進行し、せん断ずれが生じやすくなる。このように、シートの目付量が少ないほど相乗的に角折れやせん断ずれの程度が大きくなり、計算値に比べてより大きな変位を示すものと考えられる。

3.3 歪分布性状

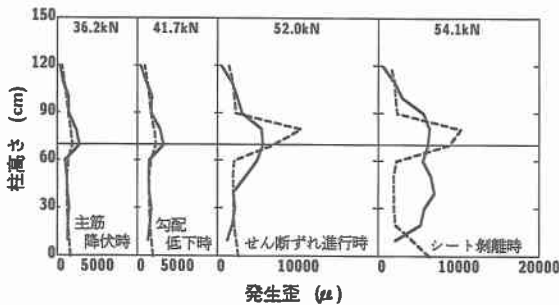
図-4には図-3と同様に各荷重段階におけるシート補強試験体の主鉄筋および引張縁のシートの歪分布を示している。図より、いずれの試験体も主鉄筋降伏時および勾配低下時において主鉄筋歪が顕著に増加する傾向は見られないことが分かる。これより、RC 柱の段落し部を AFRP シートで曲げ補強した試験体は、無補強試験体に見られるような主鉄筋降伏直後の段落し部を起点とした角折れやそれに伴うひび割れの開口が抑制されていることがわかる。せん断ずれ進行時には段落し部の主鉄筋の歪が急激に増大し、それに伴いシートの歪も増大している。また、シートに発生する大きな歪の分布範囲が柱上下方向に拡大していることが確認できる。なお、この傾向は A200 試験体で最も荷重が小さいにも関わらず顕著である。これは、前述したように段落し近傍のかぶり部に発生した曲げおよび斜めひび割れにより形成されるコンクリートブロックがシートを押し出し引き裂がすピーリング作用が柱上下方向に拡大し、同時にせん断ず



(b) A200 試験体



(c) A415 試験体



(d) A830 試験体

図－4 各荷重段階における歪分布性状

れが顕著になるためと考えられる。

A200試験体のシート破断時における段落し部の主鉄筋歪は段落し部より若干上方で最大値を示し、主鉄筋の降伏範囲は段落し周辺のみの狭い範囲であることが分かる。一方、AFRPシートの歪は段落し近傍で最大20,000 μ を示し、シートが破断して破壊したことが伺われる。なお、シートが大きな歪を示す領域は段落しより下方により拡大している。A415試験体のシート剝離時の主鉄筋歪は段落しより若干上方で大きく、A200試験体よりも降伏領域が多少広がっている。一方、AFRPシートの歪は最大でも10,000 μ 以下であり、A200試験体に比べて柱上下に大きな歪を示す領域が拡大している。特に柱下方への領域拡大が顕著であり、このため柱下方でのシート剝離破壊に至ったものと考えられる。

A830試験体のシート剝離時における段落し部の主鉄筋歪は荷重が最も大きいにも関わらず他の試験体よりも小さく、かつ柱基部の主鉄筋歪は5,000 μ 程度と他よりも大きく示されている。これは、シート剝離時の荷重

近傍において試験体の破壊が段落し部から基部に移行しつつあったことを示している。一方、シートの歪は最大でも6,500 μ 程度であり、主鉄筋の歪よりも多少小さい程度である。なお、シートが大きな歪を示す領域は、A415試験体ほどは柱上下に拡大していないが、この場合も柱下方により拡大する傾向が見られる。このため、A830試験体も柱下方でのシート剝離破壊に至ったものと考えられる。RC梁におけるシートの剝離破壊は主鉄筋の降伏領域の拡大と密接に関連していることが著者等の既往の研究で明らかとなっている。しかしながら、段落しを有する柱部材では主鉄筋の降伏領域の拡大は顕著でなく、シートの剝離に密接に関連する因子が他にあるものと推察される。

3. 4 破壊性状

写真－1にせん断ずれ進行時、シート剝離破壊時の状況を示す。シート補強試験体の側面のひび割れ性状の観察結果や変位分布、歪分布の検討結果から、段落しを有するRC柱に貼り付けたFRPシートの剝離メカニズムは下記のように推察される。1) 段落し部に曲げひび割れが発生し、かぶりコンクリート部には角折れの進行とともに斜めひび割れが生じて、引張縁かぶり部にコンクリートブロックが形成される。2) シートがコンクリートブロックによって押し出されて部分的に剝離して角折れがさらに助長される。3) 角折れの進行とともに段落し部を境にして柱上方が水平方向にせん断ずれを起こす。4) 角折れやせん断ずれ量が大きくなり、広域的なピーリングが発生してシート剝離に至る。すなわち、段落しを有するRC柱に貼り付けたFRPシートの剝離には、RC梁と異なり段落し部のピーリング現象やせん断ずれが大きく影響しているものと考えられる。

4 まとめ

本研究ではFRPシートを用いた合理的な曲げ補強設計手法確立のため、段落しを有するRC柱をFRPシートで曲げ補強した場合のシートの曲げ補強効果や剝離性状に関して詳細に検討を行なった。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) FRPシート曲げ補強RC柱の降伏荷重は精度良く断面分割法で算定できる。
- 2) シート補強量が小さいほど実測最大荷重と計算最大荷重は対応するが、終局変位は大きく異なる。
- 3) 曲げ補強シートの剝離は段落し部近傍に形成されるコンクリートブロックがシートを押し出し引き剥がすピーリング作用やせん断ずれの拡大によって生じ、RC梁の剝離メカニズムと大きく異なる。

参考文献

- 1) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一: RC梁に接着したFRPシートの曲げ付着特性に与えるシート補強量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No.1, pp.481-486, 2000.